МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.73.043
10.23947/1992-5980-2018-18-1-38-49

Особенности экономичных схем штамповки поковки сложной формы в открытом штампе, проектируемых с применением численного моделирования*

А. В. Вовченко[1], К. А. Костенко[2], О. И. Катрич[3]**
[1,2,3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Features of efficient schemes of complex-shaped forging stamping in an open die designed using numerical simulation***

A. V. Vovchenko[1], K. A. Kostenko[2], O. I. Katrich[3]**
[1,2,3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Исследуется процесс объемной штамповки (ОШ) поковки сложного сечения в открытом штампе. Цель работы — определение формы и числа технологических переходов штамповки для достижения условий ограничения по принятым параметрам. При проведении изысканий определялись следующие снижаемые параметры: неравномерность деформированного состояния в рассматриваемом сечении готовой поковки; расход металла на облойную часть поковки; относительная протяженность стадии доштамповки (течение металла только в облой).
*Материалы и методы***.** Исследования базируются на применении численного метода конечных элементов (МКЭ) к решению прямых и обратных задач формоизменения в процессе объемной штамповки. В качестве программного средства использован комплекс *QForm*.
Результаты исследования. Показано, что расход металла может быть снижен с 13–17 % от объема поковки в выбранном сечении до 1,8–3,5 %. Относительная протяженность стадии доштамповки может быть сокращена с 17 % до 0,4 %. Неравномерность распределения накопленной деформации по сечению оценивалась по соответствующему критерию. Он может быть снижен до пределов, характерных для задач оптимизационного уровня (при использовании заготовки фасонной формы) или уровня рациональных значений (при введении одного заготовительного перехода).
Обсуждение и заключения. Рассматриваемая в работе количественная система оценки процессов штамповки может применяться в обобщенном виде к любым формам изделий ОШ. Это позволяет повысить качество поковок и существенно снизить их технологическую себестоимость.

Ключевые слова: объемная штамповка в открытых штампах; метод конечных элементов (МКЭ); неравномерность распределения деформированного состояния; относительная протяженность стадии доштамповки; расход металла на облой.

Introduction. The die stamping (DS) process of the compound cross-section in an open die is considered. The work objective is to determine the form and number of operating steps to obtain the limiting conditions by the adopted parameters. During the investigation, the following lower parameters are determined: uneven strained condition of the considered section of the finished forging; metal consumption on the forging flashes; relative length of the stage of stamping finishing (metal flow only to the flash).
Materials and Methods. The study is based on the use of the numerical finite element method (FEM) for the solution to direct and inverse problems of the component forming under die forging. *QForm* package is used as a software tool.
Research Results. It is shown that the metal consumption can be reduced from 13-17% of the forging volume in the selected section to the values of 1.8 to 3.5%. The relative length of the stamping finishing stage can be reduced from 17% to 0.4%. The nonuniformity of the distribution of the cumulative deformation along the cross-section is estimated by the corresponding criterion. It can be reduced to the limits typical for optimization-level tasks (when using a profile piece-part) or a level of rational values (under the introduction of a single blanking pass).
Discussion and Conclusions. The quantification of stamping processes considered in this paper can be applied in the generalized type to any form of DS products. This allows improving the quality of forgings and significantly reducing their production cost.

Keywords: bulk forming in open dies; finite element method (FEM); deformed state uneven distribution; relative length of stamping finishing stage; metal consumption on forging flash.

*Работа выполнена в соответствии с планом госбюджетных исследований.
**E-mail: A_Vovchenko@mail.ru, Cost.Costenko@yandex.ru, OKatrich_2704@mail.ru
*** The work is done on the state-financed research plan.

Образец для цитирования: Вовченко, А. В. Особенности экономичных схем штамповки поковки сложной формы в открытом штампе, проектируемых с применением численного моделирования / А. В. Вовченко, К. А. Костенко, О. И. Катрич // Вестник Дон. гост. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18 № 1. — С. 38−49.

For citation: A.V. Vovchenko, K.A. Kostenko, O.I. Katrich. Features of efficient schemes of complex-shaped forging stamping in an open die designed using numerical simulation. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 18, no.1, pp. 38−49.

Введение. Для развития процессов обработки металлов давлением (ОМД) используются проектно-технологические решения, связанные с одновременным повышением качества продукции и достижением экономии металло- и энергозатрат. В объемной штамповке (ОШ) именно эти показатели наиболее полно учитывают специфику организации технологий кузнечно-штамповочных производств (КШП) (прежде всего, их сложность и масштабность) и позволяют конкурировать с другими направлениями металлургии и машиностроения[1].

Наряду с процессами ОШ в открытых штампах широкое распространение получили схемы процессов закрытой штамповки. Они позволяют снижать показатели расхода штампуемого металла при более равномерном распределении деформированного состояния по объему поковок за счет повышения средних показателей напряженного состояния. Кроме того, данный подход обеспечивает более широкую линейку сложных форм получаемых изделий.

Процессы открытой ОШ в настоящее время широко распространены, особенно в области производства поковок с большими массогабаритными показателями. Это объясняется рядом факторов. Во-первых, закрытая ОШ предъявляет более жесткие требования к точности заготовок. Во-вторых, существенно возрастают требования к усилиям процессов штамповки одинаковых по сложности и массе поковок. Кроме того, на штамповом инструменте возникают контактные напряжения большей амплитуды [2]. Эти факторы обусловливают выбор оборудования большей мощности и способствуют увеличению частоты критического износа штампового инструмента.

Отмеченные технологические сложности решены лишь частично. Проблема повышенной энергоемкости процессов остается актуальной, и именно она оказывает влияние на параметры относительной экономической оценки технологий ОШ.

Кроме того, при рассмотрении процессов ОШ сравниваются явные и косвенные показатели качества штампуемых поковок, в частности эксплуатационные свойства получаемых из них деталей. На изделие существенно влияет неравномерность распределения деформированного состояния по объему поковок. Этой особенности уделялось внимание в исследованиях [3, 4]: было показано, что процессы открытой ОШ в этой части более уязвимы. В условиях производства подобные показатели оценивают по факту экспериментального внедрения технологий и последующего структурного анализа образцов продукции. Однако анализ макро- и микроструктуры в объемах всей поковки достаточно часто сводится к субъективной оценке групп контрольных областей, поэтому требует от экспертного персонала опыта и высокой квалификации, а от технологов — быстрых и корректных решений по изменению технологий и параметров уже изготовленной штамповой оснастки [5]. Особенно актуален этот вопрос для изделий новой формы, относящихся к поковкам ответственного назначения. Таким образом, весьма актуальны технологические решения, которые:
— изначально направлены на заданные показатели процессов;
— получены еще на стадии проектирования;
— основаны на применении расчетных подходов с системой количественной оценки результатов;
— позволяют исключить или снизить количество итерационных корректировок сформированной технологии.

Для процессов ОШ в открытых штампах характерно вытеснение избытков металла в облой. Его зауженная первая часть — мостовая (см. периферийные элементы слева и справа на рис. 1, *б*) в процессе сближения инструмента обеспечивает подпор (повышение гидростатического напряжения) металла, находящегося в ручье, — таким образом, выполняется заданное формообразование (получается заданная форма).

[1] Актуальность ОМД в отдельных направлениях машиностроительного производства подтверждается, в частности, примером изготовления ОШ сферического инструмента для горно-перерабатывающей промышленности [1].

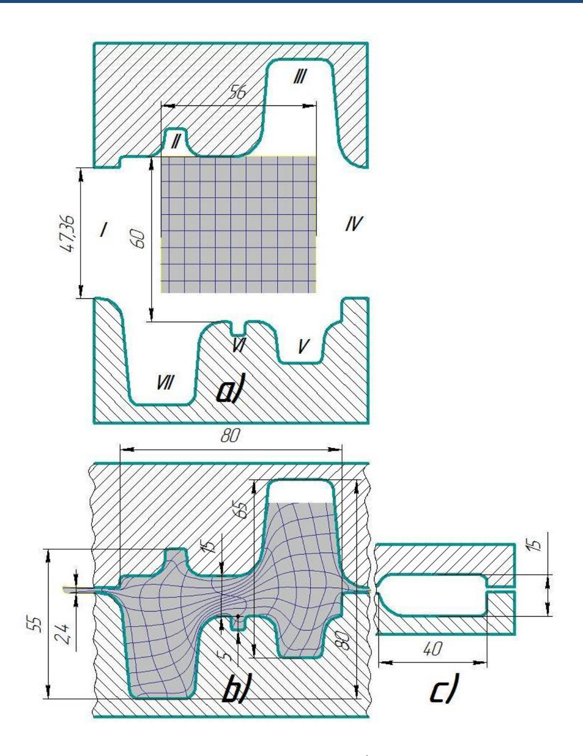


Рис. 1. Схема «7» экономичной штамповки поковки за один переход (данные прямого конечноэлементного моделирования): начальная стадия (*а*); конечная стадия (*б*); фрагмент магазина облойной канавки чистового ручья (*в*) не показан на поз. (*а*), (*б*)

Fig. 1. Scheme "7" of efficient forging stamping in a single pass (data of direct finite-element modeling): initial stage (a); final stage (б); fragment of flash gutter magazine of finishing die (в) is not shown on position (а), (б)

В работе [4] показано, что объем облоя в существенной мере зависит от формы исходной заготовки, поступающей в окончательный (чистовой) ручей. Применение фасонных заготовительных форм позволяет сократить этот объем (снизить металлозатраты) до рациональных значений — «полезных», в пределах облойного мостика [4].

Второй негативный аспект (необоснованное повышение усилий и работы деформирования) связан с формированием локального интенсивного течения металла в облой [3]. В производственных условиях некорректный выбор размеров и форм заготовок или полуфабрикатов (получаемых на предшествующих заготовительных переходах) приводит к появлению дефекта «невыполнение формы», сопровождающегося вытеснением этого же объема металла в магазинную часть облоя (рис. 1, *в*). Чрезмерный избыток вытесняемого металла без значимого течения непосредственно в объеме ручья приводит к появлению негативного эффекта доштамповки. Доштамповка сопровождается повышением необходимого усилия минимум на 60 % [4] и обусловливает локализацию деформации не по всему объему изделия, а непосредственно в линзообразной области, расположенной в плоскости облойного мостика (плоскости разъема штампа, по данным Е. И. Семенова) [4]. Это пагубно влияет на структуру и прочностные свойства поковки, что наглядно продемонстрировано в [3].

Таким образом, следует комплексно решать проблемы экономии штампуемого металла, снижения технологических энергозатрат и получения поковок с равномерным распределением деформированного состояния (и как следствие — структуры). Предполагается выбор рациональных или оптимальных форм заготовок и необходимого количества заготовительных переходов, позволяющего эту форму получить [6].

В статье представлены результаты определения рациональных размеров и форм заготовок и полуфабрикатов. Учитывая эти данные и используя конечноэлементное моделирование для анализа задач формоизменения [7], можно достичь обозначенных выше показателей.

В этом смысле представляется перспективным решение проблемы совершенствования процессов открытой ОШ в части повышения таких ее показателей, как:
— экономия металлозатрат (за счет уменьшения размера облоя);
— снижение показателей протяженности стадии доштамповки (и, как следствие, экономии энергозатрат);
— повышение качественных структурных показателей готовых изделий, оцениваемых по объемному распределению деформированного состояния в них.

Исследуется возможность рационального получения поковки заданной сложной формы сечения посредством открытой ОШ. С этой целью решаются прямые и обратные задачи постадийного формоизменения численным методом конечных элементов (МКЭ). В качестве программного продукта используется *QForm* [7].

В качестве модельного материала рассматривается *Pb* при $t = 20^{\circ}$ С. В исследовании рациональность разработанных схем оценивается по ряду технологических параметров и показателей, характерных для получаемого изделия:

— сниженный расход металла на облой;
— низкая неравномерность распределения накопленной деформации внутри поковки;
— сокращенная протяженность стадии доштамповки.

Для анализа результатов применяются (и совершенствуются) методики количественной оценки:

— геометрической сложности получаемой поковки;
— неравномерности распределения деформации внутри нее;
— протяженности стадии доштамповки.

Геометрическая сложность формы готовой поковки (рис. 1, *б*) оценивалась после исключения облоя по методике, рассмотренной в [8], — по критерию S_T, который для рассматриваемой поковки (рис. 1, *б*) составил $S_T \approx 2{,}55$. В работе [6] описаны особенности применения данной методики для асимметричных сечений.

Материалы и методы. Методика оценки размеров облоя. Размеры облоя при штамповке на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП), согласно справочным рекомендациям [2], оцениваются по его толщине (h) и объему ($V_{\text{о}}$), который в общем случае состоит из объема мостика ($V_{\text{мост}}$) толщиной $h_{\text{мост}}$ и объема магазина ($V_{\text{маг}}$) толщиной $h_{\text{маг}}$:

$$V_{\text{о}} = V_{\text{мост}} + V_{\text{маг}}. \quad (1)$$

В общем случае облойная канавка в ручье штампа КГШП может иметь как нормированную ширину магазина (рис. 1, *в*), так и ненормированную. В случае применения калибровочных ручьев широко распространена форма с малым объемом облоя в виде гладкого постоянного зазора, высота которого составляет 56–70 % от толщины мостика в ручьях с магазинным облоем.

При штамповке на КГШП усилием 16 МН рекомендуется выбирать высоту мостика $h_{\text{мост}} = 2{,}0\ldots2{,}5$ мм, а ширину $b = 5\ldots6$ мм. Используемые в моделировании параметры ручья $h_{\text{мост}} = 2{,}4$ мм и $b = 10$ мм исходно применялись на производстве и остаются неизменными до настоящего времени. Эти размеры определяют максимальный объем облоя ($V_{\text{о}}$) для условного случая его полного заполнения (см. рис. 1, *в*): в пределах 34 % от объема поковки[2] без облоя (куда включен и объем мостовой части — 2,13 %). Последнее в практике рациональной организации штамповки происходит крайне редко. Традиционно магазинная часть рационально заполняется на 1/3–1/2, что вместе с мостовой частью составляет приблизительно 13–17 % дополнительного отхода металла при обрезке облоя (от массы готовой поковки)[3].

Рациональность представленных значений подтверждается другими работами. Например, в [9] приводятся данные для более простых форм осевых сечений двух поковок со значениями $S_T = 1{,}31$ и $S_T = 1{,}01$. Для этих показателей авторы исследований снизили объем облоя ($V_{\text{о}}$) с угаром металла с 30 % до 12 % и с 38 % до 22 % соответственно[4].

Как следует из отмеченного, значение принятого расхода металла на облой с частичным заполнением магазинной части существенно меньше, чем в приведенных двух примерах при более сложной форме поковки. Но даже эти параметры можно снизить, применив методики рационального проектирования.

Принятая в настоящих исследованиях методика по данным численного моделирования базировалась на положениях организации формообразования поковки, при которой планировалось, что расход объема штампуемого металла на облой придется исключительно на мостовую часть, то есть

$$V_{\text{маг}} \to 0 \text{ и } V_{\text{о}} \to V_{\text{мост}}. \quad (2)$$

В полученных вариантах схем штамповки по результатам прямого численного моделирования, часть из которых представлена далее на иллюстрациях, выполнить точно условие (2) не удалось, но оказалось вполне возможным приблизиться к заданным показателям.

Следует заметить, что сокращение объема поковки на величину $V_{\text{маг}}$ привело к необходимости организации рациональных схем заполнения чистового ручья с выполнением формы поковки до или во время заполнения мостовой части облойной канавки. Таким образом была исключена возможность управления выполнением формы за счет увеличения размера заготовки, формирующего стадию доштамповки.

---

[2] Данное значение приводится в соответствии с рассматриваемым контрольным сечением поковки (по площадям).
[3] Ограничение действительно, если при формировании контура чистовой поковки нет других статей расхода металла — таких, как удаление перемычек при прошивке и пр.
[4] Значения отхода металла приводятся относительно массы готовой поковки уже без облоя. Рассматриваемые примеры изготовления поковок исследовались Т. Алтан, Н.-Дж. Хеннинг, А. М. Сабровым (Колумбийская лаборатория института им. Бэттла, США) и Х. Толкиеном (Германия). Критерии геометрической сложности упоминаемых поковок рассчитывались авторами настоящей статьи по чертежам сечений, представленным в [9].

Методика анализа неравномерности распределения деформированного состояния. Учитывая результаты работы [10], оценка неравномерности распределения накопленной деформации по сечению выполнялась по параметру J_5, минимизация которого определяла вариант технологического процесса штамповки и методику его расчета:

$$J_5 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| \varepsilon_{cp} - \varepsilon_i \right| \cdot S_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i} . \tag{3}$$

Здесь ε_i и S_i — соответственно интенсивность степени деформации на произвольном (i-м) участке сечения и площадь этого участка; ε_{cp} — средневзвешенное по площади (объему) значение интенсивности степени деформации по сечению поковки. В рассматриваемом случае параметры S_i определялись площадью ячеек, образованных линиями Лагранжевых координат.

Цель расчетов — определение заготовительных форм полуфабрикатов (и как следствие — форм заготовительных ручьев штампа), поступающих в чистовой ручей. Для них выражение (3) в рассматриваемом сечении поковки принимает минимальное значение:

$$J_5 \to \min . \tag{4}$$

В соответствии с данными работы [11], применяемый оценочный подход обладает значительной общностью не только по разновидностям процессов ОМД, но используется и в задачах более высокого уровня. Речь идет о задачах оптимизации технологии, решаемых методом динамического программирования.

Управление процессом формообразования осуществлялось посредством ограничения минимального числа степеней свободы течения металла на расчетных стадиях чистового перехода штамповки. При этом учитывалась деформационная история формообразования используемого полуфабриката. На рис. 1, *а* эти степени свободы определены семью возможными направлениями течения в чистовом ручье (I–VII).

Методика оценки протяженности стадии доштамповки. Исследования направлены на полное исключение стадии доштамповки из процесса. Однако в открытых штампах достичь этого сложно, можно лишь сократить относительную протяженность доштамповки. Поэтому в исследованиях используется методика, предложенная в [12]: количественно оценивается значение величины перемещения подвижной части штампа. Процесс сопровождается течением металла в рассматриваемом объеме (полости штампа) в одном направлении и относится к общему перемещению, отсчитываемому с момента контакта с заготовкой. При наличии одной основной полости в объеме осесимметричной поковки применялось выражение вида [12]:

$$\Delta h^{(i)} = \left| \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)_{HOR} - \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)_{VER} \right| \times 100\% , \tag{5}$$

где $\left(\frac{h}{h_{\max}} \right)_{HOR}$ — значение относительной величины контактного рабочего хода верхней (подвижной) части штампа, соответствующее течению металла в горизонтальном направлении в рассматриваемой полости; $\left(\frac{h}{h_{\max}} \right)_{VER}$ — то же, но в вертикальном направлении течения.

Значение любой из двух величин вида $\left(\frac{h}{h_{\max}} \right)$ определяется заполнением полости ручья с учетом объема облойной части в пределах облойного мостика. Следует заметить, что в процессе формоизменения одна из двух компонент (5) всегда соответствует значению 100 % (так как одно из течений всегда происходит до завершения процесса штамповки), а вторая — в лучшем (идеальном) случае стремится к этому же значению. В остальных случаях при завершении течения металла в одном из направлений (например, в вертикальном) рассогласование между двумя компонентами возрастает: $\Delta h^{(i)} > 0$. Поэтому длительность течения только во втором направлении (чаще в горизонтальном) считается негативным явлением, именуемым стадией доштамповки. В случае остаточного течения по вертикали такое явление соответствует схеме выдавливания и не является стадией доштамповки. Оно также сопровождается ростом параметра J_5, поэтому считается негативным, но приоритетным в отношении горизонтального остаточного течения.

Как видно из формы сечения поковки (см. рис. 1) в условиях плоского деформированного состояния, рассматриваемая конфигурация характеризуется двумя крупными полостями — в левой и правой частях контура (их образуют фрагменты гравюры ручья: II, VII; III, V). В этой связи выражение (5) может трактоваться поразному. Идеальный случай, формирующий условия минимальных энергозатрат, — заполнение чистового ру-

чья, когда металл в конце процесса течет во всех направлениях (I–VII). Именно такие схемы должны определять постановку задачи обратного моделирования. Но в результате погрешностей при проверочном прямом моделировании часто выявляется расхождение числа направлений течения. (Речь идет о погрешностях, связанных с исходной некорректностью обратных задач [13], а также с применением для их решения метода и алгоритма обращения движения деформирования [14].) В этой связи возможны две трактовки выражения (5).

1. Величина $\Delta h^{(1)}$ определяется из условий заполнения штампа, при которых помимо горизонтальных облойных течений присутствует вертикальное течение хотя бы в одной из двух основных полостей — вверх или вниз.

2. Величина $\Delta h^{(2)}$ определяется из условий заполнения штампа, при которых помимо горизонтальных (облойных) течений присутствуют по крайней мере два вертикальных: по одному одновременно в каждой из двух основных полостей — вверх или вниз.

Таким образом, в первом случае речь идет о протяженности двунаправленного течения штампуемого металла в одной из двух крупных полостей, когда вторая считается уже заполненной. Во втором случае речь идет о протяженности двунаправленного течения штампуемого металла в двух основных полостях одновременно. Поэтому для одного и того же процесса оценка протяженностей всегда будет соответствовать условиям сравнения:

$$\Delta h^{(2)} \geq \Delta h^{(1)}. \tag{6}$$

Причем условие равенства будет применимо только для случая идеального — многонаправленного (по всем направлениям) течения до самого конца процесса.

Иными словами, условие минимизации

$$\Delta h^{(2)};\ \Delta h^{(1)} \to \min \tag{7}$$

при поиске рациональных вариантов штамповки по минимальной протяженности стадии доштамповки может быть сведено к более простой форме:

$$\Delta h^{(2)} \to \min. \tag{8}$$

Следует отдельно отметить, что значения показателя J_5 и параметров $\Delta h^{(i)}$ в существенной мере определяются сложностью геометрической формы получаемых поковок: чем сложнее форма изделия ($S_T \to \max$), тем выше предельные значения указанных переменных и тем сложнее добиться их снижения в соответствии с условиями (4) и (8).

Известна приближенная функциональная зависимость влияния сложности геометрической формы поковки на пороговые значения критерия неравномерности распределения накопленной деформации. Она представляется в виде статистически полученных полиномиальных условий $J_5 \geq f(S_T)$, имеющихся в явном виде для диапазона $S_T \in [1\ldots3]$ [15] (в соответствии с которыми оптимальные значения J_5 при $S_T \approx 2{,}55$ не должны превышать 0,402, а рациональные — 0,484)[5]. Однако для условия (8) таких выражений нет, т. к. данный параметр подлежит обязательной абсолютной минимизации, что в реальных условиях выполняется редко.

Результаты исследования. Представляемые результаты получены моделированием процессов ОШ численным методом конечных элементов при действующем значении фактора контактного трения 0,3 и глубине сечения поковки 40 мм. Использован программный комплекс *QForm* [7].

Применение двух расчетных методик обусловило разделение результатов на две группы.

1) Данные, полученные прямым моделированием формообразования. Это диагностический подход при заранее принятой форме сечения заготовки: расчетом определяется возможность и результативность получения из нее поковки.

2) Данные, полученные обратным моделированием. В этом случае исходя из формы поковки рассчитывалась форма рациональной заготовки на предварительном переходе штамповки при сформулированных граничных условиях. Обратный расчет проверяется прямым.

Первая группа данных разделяется на три подгруппы — в соответствии с исследованными схемами штамповки из заготовок: прямоугольной (квадратной) формы (например, рис. 1); фасонной Н-образной (изотропной) формы (если такая заготовка поступала непосредственно в чистовой ручей); Н-образной (анизотропной), полученной на заготовительном переходе штамповки (рис. 2, 3) в этом же штампе (ее параметры аналогичны предшествующим формам).

[5] В работах [6, 15] значение критерия J_5 в зависимости от применяемых процедур поиска схем расчетной и экспериментальной штамповки классифицируется как оптимизационные методы, методы рационального поиска и прочие (промышленные и нерациональные).

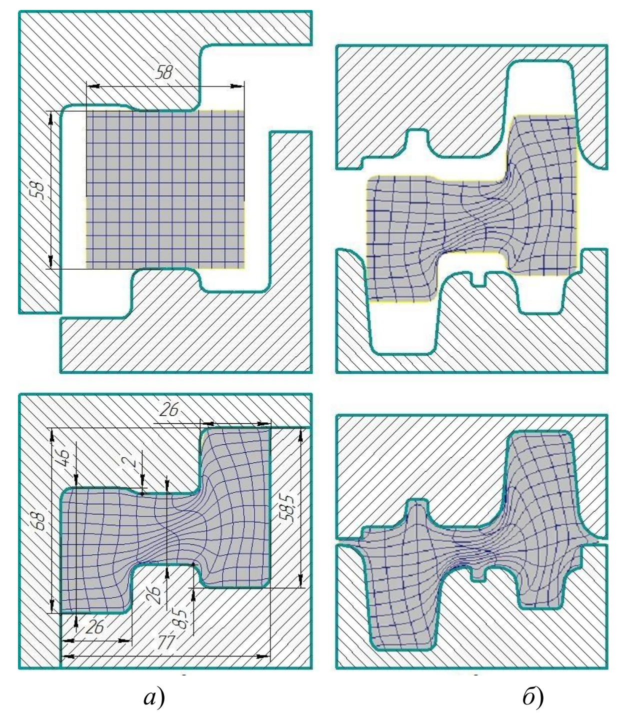


Рис. 2. Вариант «13+» штамповки поковки в два перехода по данным прямого конечноэлементного моделирования: заготовительный (*а*); чистовой (*б*)

Fig. 2. Option “13+” of forging stamping in two passes according to direct finite element modeling data: blank (a); finishing (б)

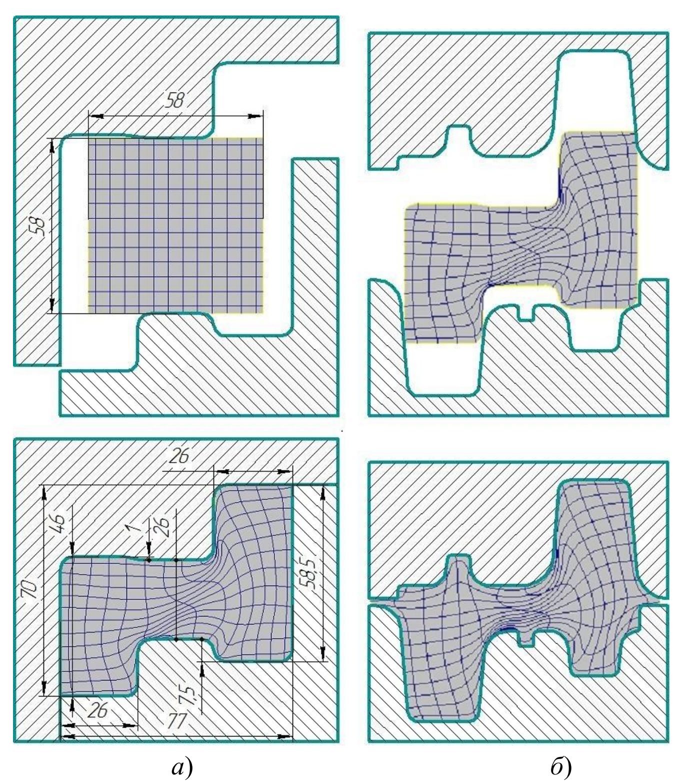
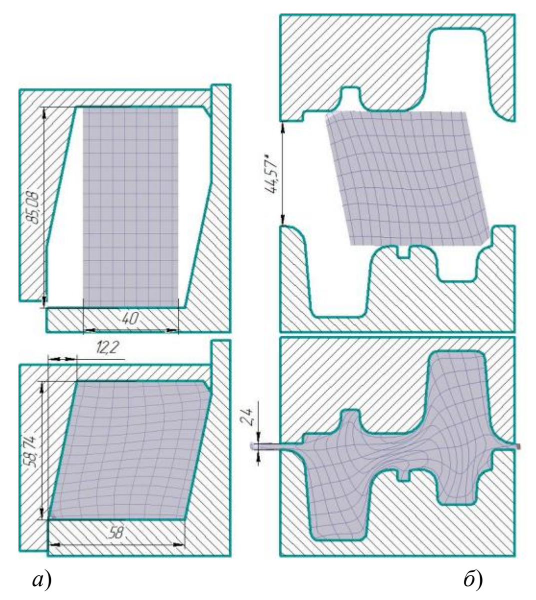


Рис. 3. Вариант «14+» штамповки поковки в два перехода по данным прямого конечноэлементного моделирования: заготовительный (*а*); чистовой (*б*)

Fig. 3. Option “14+” of forging stamping in two passes according to direct finite element modeling data: blank (a); finishing (б)



а) *б*)

Рис. 4. Вариант «3» штамповки поковки в два перехода, полученный посредством решения обратной задачи ОШ и представленный по данным прямого конечноэлементного моделирования: заготовительный (*а*); чистовой (*б*)

Fig. 2. Option "3" of forging stamping in two passes obtained by DS inverse problem solution and according to direct finite element modeling data: blank (a); finishing (б)

Результаты использования методики обратного моделирования представлены примером штамповки (см. рис. 4) поковки из полуфабриката с сечением в форме параллелограмма. Образец штамповался на заготовительном переходе и кантовался на 90° при установке в чистовой ручей. Все положительные результаты были классифицированы по четырем подгруппам и представлены в табл.

Таблица1
Table 1

Результаты математического моделирования анализируемых схем ОШ (МКЭ)

Results of mathematical simulation of analyzed schemes of die forging (FEM)

№ схемы	Сечение заготовки, мм	Число переходов	Доштамповка, Δh, %		Расход металла на облой, $V_о$, %	Критерий J_5	Примечание
			Δ$h^{(1)}$	Δ$h^{(2)}$			
1. Прямоугольные заготовки							
7	56×60	1	0,66	1,91	2,65	0,565	Рис. 1. P_{max} = 0,49 МН; А = 2,79 кДж
9	58×58	1	0,69	3,7	2,7	0,568	P_{max} = 0,47 МН; A = 2,66 кДж
19	54×62	1	0,97	1,38	2,62	0,647	P_{max} = 0,48 МН; A = 1,91 кДж
2. Н-образные изотропные заготовки							
13	Рис. 2, *а*	1	0,15	0,55	1,8	0,266	P_{max} = 0,4 МН; A = 1,9 кДж
14	Рис. 3, *а*	1	0,12	0,606	1,88	0,268	P_{max} = 0,4 МН; A = 2,0 кДж
3. С промежуточным образованием Н-образных анизотропных форм на заготовительных переходах							
13+	58×58	2	0,15	0,39	1,8	0,488	Рис. 2. P_{max} = 0,3/0,4 МН; A = 2,21 + 1,94 = 4,15 кДж
14+	58×58	2	0,12	0,5	1,88	0,537	Рис. 3. P_{max} = 0,3/0,4 МН; А = 2,24 + 2,06 = 4,3 кДж
4. С применением методики направленного (обратного) моделирования							
1	45×75,65		3,8	17,6	2,71	0,652	P_{max} = 0,162/0,162/0,52 МН; A = 1,11 + 2,13 + 0,8 = 4,04 кДж
2	45×75,65	3	5,2	17,6	2,94	0,643	P_{max} = 0,73/0,165/0,53 МН; A = 1,59+2,2+0,86 = 4,65 кДж
3	40×85	2	0,12	2,4	3,5	0,483	Рис. 4. P_{max} = 0,275/0,5 МН; A = 2,46 + 4,52 = 6,98 кДж

Исследовалась также возможность применения заготовок круглого поперечного сечения непосредственно в чистовом ручье с различными условиями позиционирования в нем и предварительными переходами осадки плоским или фасонным инструментом. Эти исследования не дали положительных результатов по выполнению формы и отсутствию приповерхностных дефектов.

Почти однотипны схемы штамповки в один переход из заготовок с прямоугольными поперечными сечениями 56×60 мм (рис. 1), 58×58 мм и 54×62 мм. Они позволяют снизить величину отхода металла в облой до 2,7 % и сократить протяженность доштамповки Δh до предела — менее 4 %. При этом формируемая неравномерность деформированного состояния J_5 существенно (в 1,17–1,34 раза) превышает рациональный предел.

Применение заготовок изотропной Н-образной асимметричной формы, полученных отдельно на заготовительном производстве (например, прокатном) и прошедших повторную термообработку перед ОШ, позволило добиться максимального снижения показателя J_5 (даже ниже максимального оптимизационного предела). Это можно объяснить непосредственным исключением влияния заготовительной формообразующей стадии полуфабриката из истории деформированного состояния готовой поковки.

Применение полуфабрикатов, аналогичных по форме предшествующим заготовкам (Н-образным), но имеющих анизотропное деформированное состояние (рис. 2, 3), сформированное на заготовительном переходе, существенно повышает значения критерия J_5 (в 1,01–1,11 раза выше рационального предела). При этом Δh снижается до минимальных значений. Существенно возрастает и разность в значениях этого критерия (при сравнении рассмотренных вариантов).

Применение методики решения обратных задач формоизменения по алгоритму обращения движения деформирования позволило получить схемы штамповки в три и два технологических перехода.

Схемы в три перехода получены в предположении, что на чистовом переходе применяется калибровка поковки в части выполнения малых элементов II и VI (см. рис. 1, *а*) совместно с оформлением облоя в пределах мостовой зоны. В этом случае были выявлены худшие значения показателей J_5 и Δh.

Схема в два перехода (рис. 4) показала следующее. Если заранее задаться всеми возможными направлениями течения металла в конце чистового перехода, то форма заготовки должна быть близка к форме параллелограмма со скошенными острыми углами. Она оказалась лучшей по условию (4) среди вариантов, в которых применяется прямоугольная форма заготовок и фасонный полуфабрикат формируется в этом же штампе на заготовительном переходе. В этом случае значения критерия $J_5 = 0{,}483$, что соответствует упоминавшимся ранее функциональным ограничениям для рациональных схем штамповки изделий с критерием геометрической сложности $S_T \approx 2{,}55$.

Обсуждение и заключения. Основные результаты анализа вариантов представлены в табл. Из них следует, что последний вариант отличается несколько большим расходом металла на облой в сравнении с остальными, но эти значения существенно ниже тех, которые приводятся в справочно-технологической литературе и в описанных выше примерах.

По данным обратного и повторного прямого численного моделирования МКЭ получена схема «3» штамповки за два перехода поковки со сложностью формы сечения $S_T \approx 2{,}55$. В этом случае расход металла на облой выше и составляет 3,5% от объема готовой поковки. Протяженность стадии доштамповки $\Delta h^{(2)} \approx 2{,}4$ %. Критерий неравномерности деформированного состояния $J_5 = 0{,}483$. Это соответствует допустимым пределам для рациональных схем $0{,}402 < J_5 \leq 0{,}484$.

На рис. 5 для сравнения представлены силовые характеристики процессов ОШ, схемы которых изображены на рис. 1–4.

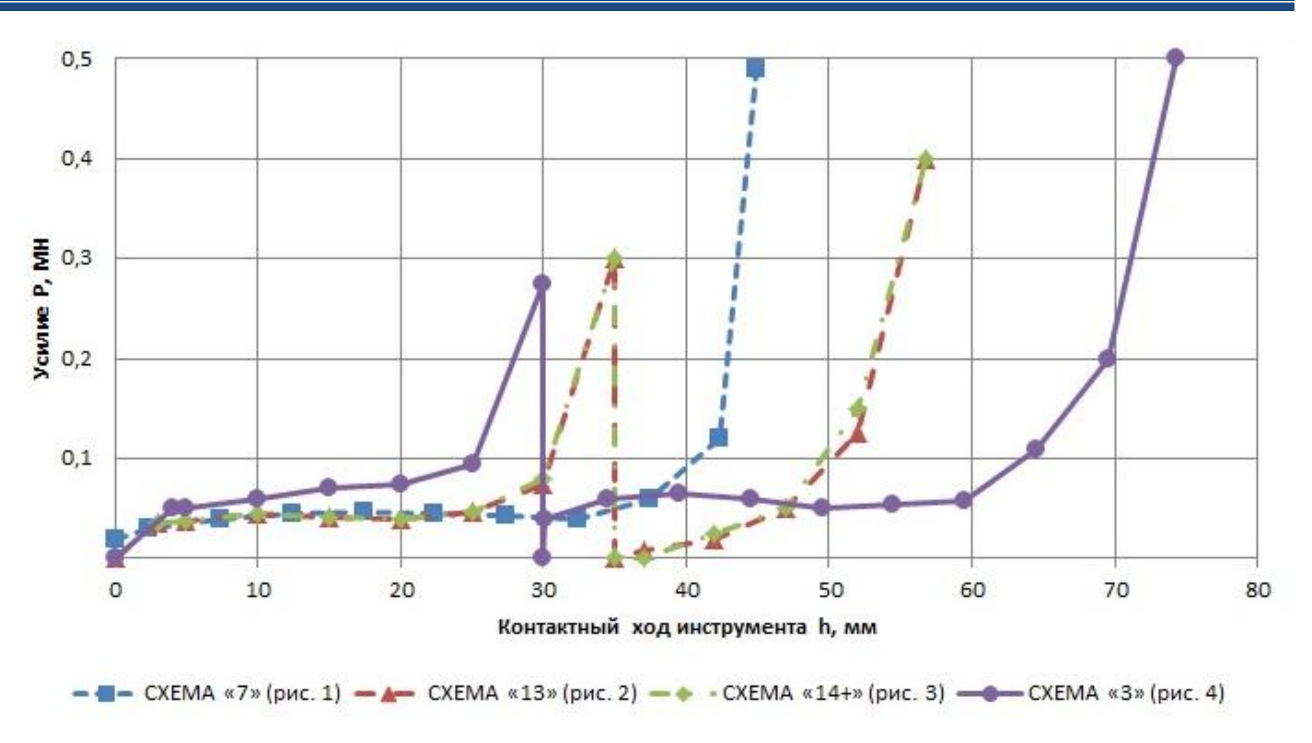


Рис. 5. Силовые характеристики основных процессов ОШ по данным моделирования МКЭ

Fig. 5. Power characteristics of major DS processes according to FEM simulation data

По мнению авторов, существенным является следующий факт. В процессе поиска рациональных решений только по результатам прямого моделирования были проанализированы несколько десятков вариантов, которые дали негативные результаты из-за дефектообразования поковок различной природы. Именно из них были выбраны семь схем штамповки, приведенные в начале таблицы. В обратной постановке рассматривались всего три схемы. Каждая из них отличается от остальных значениями анализируемых показателей, но обратный подход позволяет гарантированно получить заданную форму поковки.

Библиографический список

1. Моделирование процесса штамповки шара / В. Н. Перетятько [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. — 2008. — № 12. — С. 30–31.

2. Ковка и штамповка. Справочник в 4 т. / Под ред. Е. И. Семенова. — Москва : Машиностроение, 1986. — Т. 2. — 592 с.

3. Губкин, С. И. Выяснение причин расслоения металла (в плоскости облойного мостика) при объемной штамповке / С. И. Губкин, А. В. Юшков, С. И. Добровольский // Сб. науч. тр. ФТИ АН БССР. — Минск : Изд-во АН БССР, 1955. — Вып. 2. — С. 16–22.

4. Охрименко, Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я. М. Охрименко. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 1976. — 560 с.

5. Заславский, В. М. Новое в технологии штамповки дисков и колес / В. М. Заславский // Кузнечно-штамповочное производство. — 1994. — № 1. — С. 25–26.

6. Вовченко, А. В. Совершенствование технологии процессов объемной штамповки на основе применения гранично-элементных расчетов / А. В. Вовченко. — Ростов-на-Дону : Изд. центр ДГТУ, 2011. — 264 с.

7. Автоматизированная система Форм-2Д для расчета формоизменения в процессе штамповки на основе метода конечных элементов / Г. Я. Гун [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. — 1992. — № 9/10. — С. 4–7.

8. Алиев, Ч. А. Система автоматизированного проектирования технологии горячей объемной штамповки / Ч. А. Алиев, Г. П. Тетерин. — Москва : Машиностроение, 1987. — 224 с.

9. Тетерин, Г. П. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки / Г. П. Тетерин, П. И. Полухин. — Москва : Машиностроение, 1979. — 284 с.

10. Резников, Ю. Н. Оптимизация заготовительных ручьев для поковок, изготовляемых объемной штамповкой / Ю. Н. Резников, Г. Г. Калинин // Кузнечно-штамповочное производство. — 1998. — № 10. — С. 8–10.

11. Reznikov, Yu. N. Ob optimizatsii protsessov deformirovaniya metallov [On the Optimization of Metal

Forming] / Yu. N. Reznikov, A. V. Vovchenko, V. E. Zhilenkov // Russian Metallurgy (Metally). — 2006. — № 1. — P. 33–37.

12. Резников, Ю. Н. Уменьшение длительности стадии доштамповки на основе моделирования формоизменения / Ю. Н. Резников, А. В. Вовченко, А. В. Быкодоров // Кузнечно-штамповочное производство. — 2001. — № 4. — С. 33–36.

13. Вовченко, А. В. О возможности улучшения решений обратных задач расчета формоизменения в процессах ОМД / А. В. Вовченко, Ю. Н. Резников, А. Н. Соловьев // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. — 2009. — № 3. — С. 60–64. — (Технические науки).

14. Reznikov, Yu. N. Raschet formy i razmerov zagotovok v protsessakh ob"emnoy shtampovki metodom verkhney otsenki [Calculation of shape and dimensions of semiproducts in processes of die forging using upper evaluation] / Yu. N. Reznikov // Steel in the USSR. — 1979. — February. — P. 78–82.

15. Вовченко, А. В. Оценка уровня оптимальности распределения накопленной деформации в поковках, изготавливаемых в открытых штампах / А. В. Вовченко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т. 11, № 6 (57). — С. 833–841.

References

1. Peretyatko, V.N., et al. Modelirovanie protsessa shtampovki shara. [Ball forming simulation.] Izvestia. Ferrous Metallurgy, 2008, no. 12, pp. 30–31 (in Russian).

2. Semenov, V.I. ed. Kovka i shtampovka. Spravochnik v 4 t. [Blachsmithing and stamping. Reference book in 4 vol.] Moscow: Mashinostroenie, 1986, vol. 2, 592 p. (in Russian).

3. Gubkin, S.I., Yushkov, A.V., Dobrovolskiy, S.I. Vyyasnenie prichin rassloeniya metalla (v ploskosti obloynogo mostika) pri ob"emnoy shtampovke. [Causation of spilly metal (in the plane of flash bridge) under die forging.] Coll. Sci. papers, FTI AN BSSR, Minsk: Izd-vo AN BSSR, 1955, iss. 2, pp. 16–22 (in Russian).

4. Okhrimenko, Y.M. Tekhnologiya kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva. [Die forging technology.] 2nd revised and enlarged ed. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 560 p. (in Russian).

5. Zaslavskiy, V.M. Novoe v tekhnologii shtampovki diskov i koles. [New in technology of forming disks and wheels.] Forging and Stamping Production, 1994, no. 1, pp. 25–26 (in Russian).

6. Vovchenko, A.V. Sovershenstvovanie tekhnologii protsessov ob"emnoy shtampovki na osnove primeneniya granichno-elementnykh raschetov. [Technological advancement of die forging on the basis of application of boundary-element calculations.] Rostov-on-Don, DSTU Publ. Centre, 2011, 264 p. (in Russian).

7. Gun, G.Y., et al. Avtomatizirovannaya sistema Form-2D dlya rascheta formoizmeneniya v protsesse shtampovki na osnove metoda konechnykh elementov. [Automated system Form-2D for calculating forming under stamping process based on the finite element method.] Forging and Stamping Production, 1992, no. 9/10, pp. 4–7 (in Russian).

8. Aliev, Ch.A, Teterin, G.P. Sistema avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologii goryachey ob"emnoy shtampovki. [CAD system of hot forging technology.] Moscow: Mashinostroenie, 1987, 224 p. (in Russian).

9. Teterin, G.P., Polukhin, P.I. Osnovy optimizatsii i avtomatizatsii proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov goryachey ob"emnoy shtampovki. [Optimization and design automation basics of hot die forging.] Moscow: Mashinostroenie, 1979, 284 p. (in Russian).

10. Reznikov, Y.N., Kalinin, G.G. Optimizatsiya zagotovitel'nykh ruch'yev dlya pokovok, izgotovlyaemykh ob"emnoy shtampovkoy. [Optimization of roughing impressions for forgings produced by bulk forming.] Forging and Stamping Production, 1998, no. 10, pp. 8–10 (in Russian).

11. Reznikov, Yu.N., Vovchenko, A.V., Zhilenkov, V.E. Ob optimizatsii protsessov deformirovaniya metallov [On the Optimization of Metal Forming.] Russian Metallurgy (Metally), 2006, no. 1, pp. 33–37.

12. Reznikov, Yu.N., Vovchenko, A.V., Bykodorov, A.V. Umen'shenie dlitel'nosti stadii doshtampovki na osnove modelirovaniya formoizmeneniya. [Pre-stamping stage time reduction based on shaping simulation.] Forging and Stamping Production, 2001, no. 4, pp. 33–36 (in Russian).

13. Vovchenko, A.V., Reznikov, Yu.N., Soloviev, A.N. O vozmozhnosti uluchsheniya resheniy obratnykh zadach rascheta formoizmeneniya v protsessakh OMD. [About a possibility of martempering of solutions of inverse problems of calculation deformation in processes of forging of metal.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2009, no. 3, pp. 60–64 (in Russian).

14. Reznikov, Yu.N. Raschet formy i razmerov zagotovok v protsessakh ob"emnoy shtampovki metodom verkhney otsenki. [Calculation of shape and dimensions of semiproducts in processes of die forging using upper evaluation.] Steel in the USSR, 1979, February, pp. 78–82.

15. Vovchenko, A.V. Otsenka urovnya optimal'nosti raspredeleniya nakoplennoy deformatsii v pokovkakh,

izgotavlivaemykh v otkrytykh shtampakh. [Assessment of optimality level of accumulated strain distribution in forgings made in open press tools.] Vestnik of DSTU, 2011, vol. 11, no. 6 (57), pp. 833—841 (in Russian).

Поступила в редакцию 30.10.2017
Сдана в редакцию 31.10.2017
Запланирована в номер 15.01.2018

Received 30.10.2017
Submitted 31.10.2017
Scheduled in the issue 15.01.2018

Об авторах:

Вовченко Арменак Владимирович,
профессор кафедры «Технологии формообразования и художественная обработка материалов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7382-1235
A_Vovchenko@mail.ru

Костенко Константин Александрович,
инженер кафедры «Технологии формообразования и художественная обработка материалов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3228-1954
cost.costenko@mail.ru

Катрич Оксана Игоревна,
аспирант, старший преподаватель кафедры «Технологии формообразования и художественная обработка материалов» Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9936-619X
okatrich_2704@mail.ru

Authors:

Vovchenko, Armenak V.,
professor of the Shaping Technologies and Material Working Art Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1), Dr.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7382-1235
A_Vovchenko@mail.ru

Kostenko, Konstantin A.,
engineer of the Shaping Technologies and Material Working Art Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-3228-1954
cost.costenko@mail.ru

Katrich, Oksana I.,
postgraduate student, senior lecturer of the Shaping Technologies and Material Working Art Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin sq., 1),
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9936-619X
okatrich_2704@mail.ru